

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS**

**UNIDAD DE POSTGRADO**

**Modelos evaluativos de optimización y de simulación de  
contaminantes del aire**

**TESIS**

para optar el Título Profesional de Magíster en Investigación de Operaciones y  
Sistemas

**AUTOR**

William Julio Andrade Torres

**ASESOR**

Tomás Núñez Lay

**Lima – Perú**

**2007**

# MODELOS EVALUATIVOS, DE OPTIMIZACIÓN Y DE SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE

por

William Julio Andrade Torres

Tesis presentada a consideración del Cuerpo Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, como parte de los requisitos para obtener el Grado Académico de Magíster en Investigación de Operaciones y Sistemas

Aprobada por:

---

Mg. Carmela Velásquez Pino  
Presidente

---

Mg. Esther Berger Vidal  
Miembro Asesor

---

Mg. Inés Gambini López  
Miembro

---

Mg. Orestes Elmore Bruno Santibáñez  
Miembro

---

Mg. Mercedes Bustos Díaz  
Miembro

## FICHA CATALOGRÁFICA



ANDRADE TORRES, WILLIAM JULIO

Modelos Evaluativos, de Optimización y de Simulación de  
Contaminantes del Aire  
(Lima) 2007

x, 108 Pág. 29.7 cms. (UNMSM, Magíster en Investigación de  
Operaciones y Sistemas, 2007)



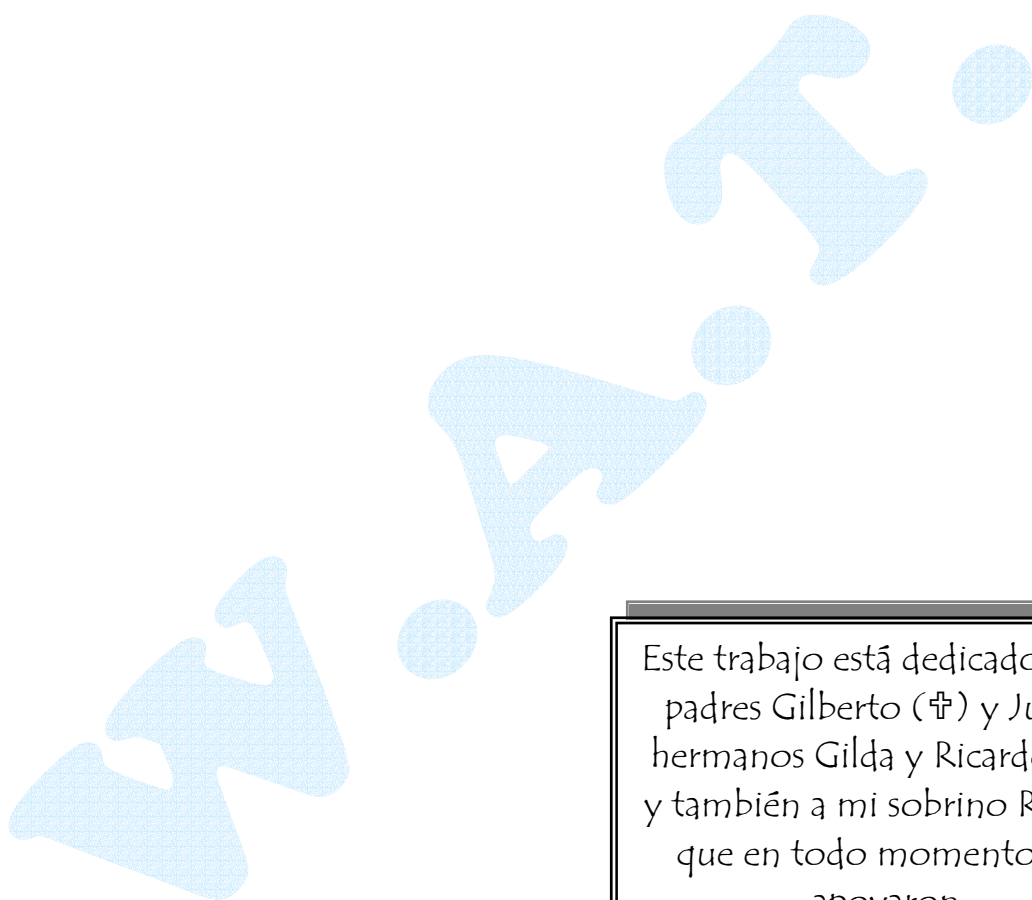
Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Facultad de Ciencias Matemáticas

Unidad de Post Grado

I. UNMSM/F de CM II. Título (Serie).

## DEDICATORIA



Este trabajo está dedicado a mis  
padres Gilberto (†) y Juana,  
hermanos Gilda y Ricardo (†)  
y también a mi sobrino Ronald  
que en todo momento me  
apoyaron

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a la profesora asesora Mg. Esther Berger, al igual que a las docentes Mg. Carmela Velásquez y Mg. Inés Gambini, por la dedicación y el apoyo brindados.

## RESUMEN

### MODELOS EVALUATIVOS, DE OPTIMIZACIÓN Y DE SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE

WILLIAM JULIO ANDRADE TORRES

MARZO - 2007

Asesor : Mg. Esther Berger Vidal

Grado Obtenido : Magíster en Investigación de Operaciones y Sistemas

---

En este trabajo, se presenta un modelo de optimización de costos para minimizar la contaminación del aire en base a dos tipos de medidas de control. El modelo se contrastó con datos históricos de la producción de cemento en una fábrica de este producto y de las emisiones diarias emanadas por ésta.

Se presenta asimismo, dos modelos evaluativos de emisiones: El primero, de emisiones de tubos de escape y el segundo, de emisiones evaporables de compuestos orgánicos volátiles (COV), ambos modelos para vehículos ligeros con motor a gasolina en condiciones específicas de clima, de conducción de vehículos y de volatilidad de la gasolina.

Además se considera un modelo de simulación por eventos en base a los datos utilizados en los modelos evaluativos mencionados anteriormente, para lo cual se tomaron en cuenta los tipos de autos según el tipo de motor para los arribos y los tipos de servicios requeridos para diferentes periodos de tiempo.

Para la obtención del modelo de optimización de costos se utiliza la técnica de Programación Lineal y para los modelos evaluativos se emplea la técnica de Simulación de eventos discretos.

PALABRAS CLAVES : CONTAMINACIÓN  
MODELO  
OPTIMIZACIÓN  
PROGRAMACIÓN LINEAL  
SIMULACIÓN

## ABSTRACT

### MODEL EVALUATES, OPTIMIZATION AND SIMULATION OF AIR'S POLLUTANTS

WILLIAM JULIO ANDRADE TORRES

MARZO- 2007

Adviser : M.S.C. Esther Berger Vidal

Obtained Degree : M.S.C. in Systems and Operations Research

---

In this work, a model of optimization of costs is presented against the environmental contamination of air based on two types of control measures. The pattern was contrasted with historical data of the production of cement in a factor of this product and of the daily emissions emanated for this.

It is presented also, two model of emissions evaporate is presented: The first one, of emissions of exhaust pipes and the second, of emissions evaporate of compound organic volatile (COV), both models for slight vehicles with motor of gasoline under specific conditions of climate, of conduction of vehicles and of volatility of the gasoline.

Lastly it is considered a simulation model by events based on the data used in the model evaluate mentioned previously, for that which they took into account the types of cars according to the motor type for the arrivals and the types of services required for different periods of time.

For the obtaining of the pattern of optimization of costs the technique of Lineal Programming it is used and for the model evaluate the technique of Simulation of discreet events it is used.

#### KEY WORDS:

POLLUTION  
MODEL  
OPTIMIZATION  
LINEAR PROGRAMMING  
SIMULATION

## INDICE

	Pág.
Resumen	
Introducción	01
CAPÍTULO I	
<b>Planteamiento del Problema</b>	03
1.1 Objetivo General	03
1.2 Objetivos Específicos	03
1.3 Justificación	04
CAPÍTULO II	
<b>Marcos Teórico, Referencial y Conceptual</b>	
2.1 <b>Marco Teórico</b>	05
2.1.1 Medidas de Preservación del Medio Ambiente	05
2.1.2 Efectos debido a la Contaminación del Aire	06
2.1.3 Propiedades Físicas y Químicas del Aire	07
2.1.3.1 Propiedades Físicas	07
2.1.3.2 Propiedades Químicas	07
2.1.4 Composición del Aire Puro	07
2.1.4.1 Troposfera	07
2.1.4.2 Estratósfera	07
2.1.4.3 Mesósfera	07
2.1.4.4 Ionósfera	08
2.1.4.5 Exósfera	08
2.1.5 Contaminación Atmosférica	09
2.1.6 Mediciones de sustancias químicas	09
2.1.7 Fuentes de Contaminación del Aire	11
2.1.7.1 Naturales	11
2.1.7.2 Debida a la actividad humana	11
2.1.8 Clasificación de los Contaminantes según las fuentes de emisión	13
2.1.9 Clasificación de los Contaminantes Químicos	13
2.1.10 Clasificación de los Contaminantes Físicos	14
2.1.11 Aspectos del deterioro del Ambiente Natural	14
2.1.12 Agentes Contaminantes Atmosféricos	14
2.1.12.1 Óxidos de Azufre	14



2.1.12.2	Óxidos de Nitrógeno	15
2.1.12.3	Óxidos de Carbono	16
2.1.12.4	Hidrocarburos	16
2.1.12.5	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	17
2.1.12.6	Materia Particulada Suspendida (MPS)	17
2.1.13	Fuentes Contaminantes	18
2.1.14	Modelo de Emisiones Evaporables	19
2.1.14.1	Modelo de Emisiones de Tubos de Escape	19
2.1.14.2	Modelo de Emisiones Evaporables de COV	24
2.1.15	Programación Lineal	27
2.1.16	Simulación	27
2.2	<b>Marco Referencial</b>	28
2.2.1	La Contaminación Atmosférica en Lima	28
2.2.2	Criterios de calidad del aire	28
2.2.3	Sumarios de Datos de Calidad del aire	30
2.2.4	La Tarjeta Ringelmann	31
2.3	<b>Marco Conceptual</b>	32
2.3.1	Conceptos sobre la Contaminación del Aire	32
CAPÍTULO III		
<b>Hipótesis y Metodología</b>		
3.1	Hipótesis de la Investigación	39
3.2	Metodología de la Investigación	39
3.2.1	Técnicas Utilizadas	39
CAPÍTULO IV		
<b>Modelos Aplicados</b>		
4.1	Modelo de Optimización	40
4.1.1	Planteamiento y Resolución del Problema	40
4.2	Modelos Evaluativos	45
4.2.1	Modelo 1 (Emisión de Tubos de Escape)	43
4.2.2	Modelo 2 (Emisiones Evaporables de COV)	45
4.2.3	Gráficos de los Factores y Multiplicadores de Emisión y Consumo de Contaminantes	50
4.2.4	Interpretaciones de los Modelos Evaluativos	57
4.3	Modelo de Simulación	59
4.3.1	Resultados de las Corridas de Simulación	61
4.3.2	Interpretaciones de la Simulación	107

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



## INTRODUCCION

La contaminación del aire es la presencia de impurezas o sustancias extrañas que pueden ser gases, o partículas líquidas o sólidas en suspensión, que debido a que superan los límites permisibles de concentración provocan efectos perjudiciales o crean molestias a los seres vivos y vegetales. En el pasado el problema no era importante, porque el volumen de contaminantes emitidos por las industrias en desarrollo era muy pequeño, y al diluirse en el ambiente se autodepuraban y perdían su nocividad; pero con el posterior aumento y concentración de la población y de las industrias, se agravó significativamente el problema, siendo cada vez mayores sus consecuencias.

La contaminación es responsabilidad del hombre cuando no toma las medidas correctivas y preventivas, para evitar la contaminación del medio ambiente y en este caso específico la del aire, por ser el elemento vital para la supervivencia de los seres vivos y por su constante desplazamiento que depende de los vientos según la estación climatológica, también cuando se producen emisiones accidentales, como por ejemplo un incendio, que podrían evitarse con las suficientes medidas de seguridad y control. No obstante, también la naturaleza produce contaminantes, como las emisiones de gases y partículas de volcanes, los efectos de los rayos, que producen el ozono y óxido de nitrógeno, como también incendios.

Por ello, en la presente investigación se diagnostica, se formula, analiza y evalúa los modelos de optimización y de simulación que minimicen los contaminantes del aire. Para realizar la formulación, análisis y evaluación de tales modelos se obtuvo información de una fábrica de cemento para el caso del modelo de optimización; igualmente para los casos evaluativos se consideró los factores de emisión y consumo de combustible con arranque en caliente para vehículos ligeros; finalmente se utilizó la técnica de simulación de eventos discretos para aplicarla a un caso específico de un centro de servicio de conversión de autos gasolineros a sistema de gas, utilizando los datos de los modelos evaluativos antes mencionados.

El presente trabajo concluye, en que de acuerdo a la fuente emisora de contaminantes (en este caso, específicamente del aire), es posible llegar a minimizar tales componentes nocivos, utilizando modelos de optimización, evaluativos o de simulación.

En la investigación se propone aplicar el modelo de optimización para el caso de la fábrica de cemento, así como la técnica de simulación para el caso del Centro de Servicios de conversión de autos gasolineros a sistema a gas empleando para ello los datos de los modelos evaluativos (de emisiones).



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al crecimiento desorganizado de la ciudad de Lima, y de su parque automotor a lo cual se suma la falta de un adecuado control de los vehículos respecto a sus condiciones técnicas y al cumplimiento de los requisitos mínimos necesarios para su circulación, se produce, especialmente en el centro de la ciudad, una alta emisión de contaminantes tales como el Monóxido de Carbono (CO), el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) en niveles perjudiciales para la salud de todo ser vivo, provocando alergias y trastornos a los sistemas nervioso, respiratorio y digestivo. Esto conlleva preguntarnos: ¿Cuál será la estrategia óptima de minimizar o reducir la contaminación del aire en casos como el planteado?

#### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener el modelo de optimización, evaluativo o de simulación que permita minimizar las emisiones de contaminantes del aire.

#### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Reducir las emisiones de contaminantes del aire a los límites permisibles en el caso específico de la fábrica de cementos, minimizando el costo total de control de tal contaminación.
- ❖ Minimizar o eliminar en lo posible el uso de vehículos que emanen gases tóxicos, erradicando progresivamente del parque automotor tales unidades, reemplazándolas por unas más nuevas.
- ❖ Crear conciencia en el ciudadano de que el medio ambiente debe cuidarse, que es el hábitat de todos los seres vivos y que de no ser así la extinción de la vida en el planeta no estaría muy lejana.

### 1.3 JUSTIFICACION

- ❖ La alta contaminación está produciendo daños muy graves en la salud de la población (en los sistemas nervioso, respiratorio y digestivo, y dermatológico)
- ❖ La alta contaminación contribuye a la disminución de la capa de Ozono O<sub>3</sub>.
- ❖ Los niveles altos de contaminación afectan el equilibrio ecológico y la conservación del medio ambiente en términos generales y en especial de la Ciudad de Lima.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCOS TEÓRICO, REFERENCIAL y CONCEPTUAL**

#### **2.1 MARCO TEÓRICO**

El propósito de ésta investigación es proponer soluciones mediante el uso de la Investigación de Operaciones para la erradicación total en un futuro cercano de las emanaciones dañinas que son generadas por vehículos motorizados, aerosoles, combustiones directas causadas por el hombre (quema de hierbas secas, papeles, llantas, plásticos, fuegos artificiales, basura, cigarro, entre otros), en lugares, como, viviendas, colegios, clubes, etc.

El medio ambiente es todo lo que naturalmente nos rodea y permite el desarrollo de la vida. El hombre tiene el derecho de hacer uso de la naturaleza y el deber de cuidarla y mantenerla pensando en el futuro.

Toda la actividad productiva, sea agrícola, minera, industrial, etc. genera cambios en el Medio Ambiente. Lo importante es encontrar el equilibrio entre el ser humano y la naturaleza para lograr una mejor calidad de vida.

##### **2.1.1 MEDIDAS DE PRESERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE:**

Son medidas necesarias e importantes para la conservación del medio ambiente:

- ♦ No arrojar aguas servidas (desagües) a los ríos ni quebradas.
- ♦ No lavar en los ríos, ni en quebradas vehículos motorizados.
- ♦ No usar sustancias tóxicas ni explosivos para pescar.
- ♦ No arrojar basura en los ríos y quebradas
- ♦ No arrojar sustancias químicas de las industrias a los ríos y lagunas.
- ♦ No botar la basura en las calles ni parques porque el calor y la humedad la descomponen.
- ♦ Evitar el contacto de las heces con los insectos, roedores u otros posibles portadores de gérmenes patógenos.
- ♦ Prevenir la contaminación de la superficie del suelo.

- ◆ No se debe contaminar ninguna fuente de agua para consumo o riego de hortalizas.
- ◆ Evitar el deterioro del paisaje.
- ◆ Evitar la quema incontrolada de residuos sólidos y basuras domésticas.
- ◆ Evitar la quema de arbustos y desechos de las cosechas.
- ◆ Evitar el uso de fertilizantes e insecticidas químicos.

### 2.1.2 EFECTOS DEBIDOS A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Los contaminantes del aire afecta a factores muy diversos; tales como:

1. **Salud humana**
  1. Enfermedades crónicas, alérgicas y dermatológicas.
  2. Sistema Respiratorio: Bronquitis, Asma, etc.
  3. Sistema Nervioso: Ansiedad, Neurosis, Cefalea, etc.
  4. Malestar general: debilidad, cansancio, etc.
  5. Envenenamiento por Plomo
  6. Depresión mental
2. **Costos de fabricación**
  1. Equipos
  2. Mantenimiento
  3. Distribución
  4. Desarrollo
  5. Pérdidas de producción
  6. Costos de limpieza
3. **Daños a materiales**
  1. Papel, libros
  2. Cueros, tejidos
  3. Pintura
  4. Edificios, piedras
  5. Metales, caucho
  6. Contactos eléctricos
4. **Reducción de visibilidad**
  1. Estética
  2. Accidentes



### **2.1.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AIRE**

El aire esencial para la vida, tiene las siguientes propiedades:

#### **2.1.3.1 Propiedades Físicas**

- Es de menor peso que el agua.
- Es de menor densidad que el agua.
- Tiene Volumen indefinido.
- No existe en el vacío.
- Es incoloro, inodoro e insípido.

#### **2.1.3.2 Químicas**

- Reacciona con la temperatura condensándose en hielo a bajas temperaturas y produce corrientes de aire.
- Esta compuesto por varios elementos entre ellos el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono, elementos básicos para la vida.

### **2.1.4 COMPOSICIÓN DEL AIRE PURO**

De acuerdo con la altitud, composición, temperatura y otras características, la atmósfera rodea a la Tierra y comprende las siguientes capas o regiones:

#### **2.1.4.1 Tropósfera**

Alcanza una altura media de 12 km. (es de 7km. En los polos y de 16km. en los trópicos) y en ella encontramos, junto con el aire, polvo, humo y vapor de agua, entre otros componentes.

#### **2.1.4.2 Estratósfera**

Zona bastante fría que se extiende de los 12 a los 50km de altura; en su capa superior (entre los 20 y los 50km) contiene gran cantidad de ozono ( $O_3$ ), el cual es de enorme importancia para la vida en la tierra por que absorbe la mayor parte de los rayos ultravioleta del sol.

#### **2.1.4.3 Mesósfera**

Zona que se sitúa entre los 50 y los 100km de altitud; su temperatura media es de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; en ella los meteoritos adquieren altas temperaturas y en su gran mayoría se volatilizan y consumen.

#### 2.1.4.4 Ionósfera

Empieza después de los 100km, y va desapareciendo gradualmente hasta los 500km de altura. En esta región, constituida por oxígeno ( $O_2$ ), la temperatura aumenta hasta los  $1000^{\circ}C$ ; los rayos X y ultravioleta del Sol ionizan el aire enrarecido, produciendo átomos y moléculas cargados eléctricamente (que reciben el nombre de iones) y electrones libres.

#### 2.1.4.5 Exósfera

Comienza a 500km. de altura y extiende más allá de los 1000km; está formada por una capa de helio y otra de hidrógeno. Después de esa capa se halla una enorme banda de radiaciones (conocida como magnetosfera) que se extiende hasta unos 55000km de altura, aunque no constituye propiamente un estrato atmosférico.

El aire limpio y puro forma una capa de aproximadamente 500,000 millones de toneladas que rodea a la Tierra. Su composición es la siguiente:

**Tabla N° 1 - Componentes del Aire**

Componente		Concentración aproximada
Nitrógeno	(N)	78.03% en volumen
Oxígeno	( $O_2$ )	20.99% en volumen
Dióxido de Carbono	( $CO_2$ )	0.03% en volumen
Argón	(Ar)	0.94% en volumen
Neón	(Ne)	0.00123% en volumen
Helio	(He)	0.0004% en volumen
Criptón	(Kr)	0.00005% en volumen
Xenón	(Xe)	0.000006% en volumen
Hidrógeno	(H)	0.01% en volumen
Metano	( $CH_4$ )	0.0002% en volumen
Óxido nitroso	( $N_2O$ )	0.00005% en volumen
Vapor de Agua	( $H_2O$ )	Variable
Ozono	( $O_3$ )	Variable
Partículas Volátiles Suspendidas		Variable

**Fuente:** Adriaansee, A. 1992. The Development of Environmental Policy Indicators in The Netherlands. Ministerio de Vivienda, Planeación Física y Medio Ambiente, Holanda.

### **2.1.5 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.**

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más preocupantes de los últimos tiempos, y es resultado de las actividades que realiza el hombre. Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, minería, transporte, comerciales, domésticas, agropecuarias, entre otras. Los principales contaminantes del aire se clasifican en:

#### **PRIMARIOS**

Son los contaminantes que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos por la fuente. Para fines de evaluación de la calidad del aire se consideran: óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.

#### **SECUNDARIOS**

Son los contaminantes que han estado sujetos a cambios químicos, o bien, son el producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera. Entre ellos destacan oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono ( $O_3$ ).

A nivel nacional, la contaminación atmosférica se limita a las zonas de alta densidad demográfica o industrial. Las emisiones anuales de contaminantes en el país son superiores a 16 millones de toneladas, el 65% es de origen vehicular.

### **2.1.6 MEDICIONES DE SUSTANCIAS QUÍMICAS**

#### **PARTES POR MILLON (PPM)**

Para determinar la concentración de una sustancia química en un volumen se utilizan las partes por millón de partes iguales. Cada millonésima parte de este volumen, correspondiente a la sustancia de nuestro interés, se considera una parte por millón de la sustancia.

Las PPM se utilizan para determinar concentraciones muy pequeñas de gases en la atmósfera.

### **PARTES POR BILLON (PPB)**

Para determinar la concentración de sustancia química en un volumen se utilizan las partes por billón. Se divide el volumen en un billón de partes iguales. Cada billonésima parte de este volumen, correspondiente a la sustancia de nuestro interés, se considera una parte por billón de la sustancia. Las PPM se utilizan para determinar concentraciones muy pequeñas de gases en la atmósfera.

### **FRACCION RESPIRABLE PARTICULAS SUSPENDIDAS (PM-10)**

- **Criterios para evaluar la calidad del aire**

150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (microgramos sobre metro cúbico) en un promedio de 24 horas.

- **Características del contaminante**

Partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera (su diámetro va de 0.3 a 10  $\mu\text{m}$ ) como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen. La fracción respirable de PST, conocida como PM-10, está constituida por aquellas partículas cuyo diámetro es inferior a 10 micras, que tienen la particularidad de penetrar en el aparato respiratorio hasta los alvéolos pulmonares.

- **Fuentes principales**

Combustión industrial y doméstica del carbón, combustible petróleo y diesel; procesos industriales; incendios; erosión eólica y erupciones volcánicas.

- **Efectos principales**

Salud: Irritación en las vías respiratorias; su acumulación en los pulmones origina enfermedades como silicosis y la asbestosis. Agravan el asma y las enfermedades cardiovasculares.

Materiales: Deterioro en materiales de construcción y otras superficies.

Vegetación: Interfieren en la fotosíntesis.

Otros: Disminuyen la visibilidad y provocan la formación de nubes.

En general los principales contaminantes como: Monóxido de carbono, Ozono, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, Hidrocarburos, plomo, y otros provocan diversos problemas.

## 2.1.7 FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE

### 2.1.7.1 Naturales:

- Polvo
- Humo
- Pulverización de agua marina
- Gases sulfurosos
- Polen
- Incendios forestales

### 2.1.7.1 Debidas a la actividad humana:

#### • Combustión

- Generación de Energía y Vapores
  - Humos negros
  - Gases:
    - $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}$
    - Vapores bencénicos
    - $\text{HCl}$
    - $\text{NO}$
- Emisiones de vehículos
  - $\text{CO}$
  - Hidroxicarbonos
  - Óxidos de nitrógeno
- Procesos de calentamiento y tueste
  - Polvos y humos
  - Gases:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SiF}_4$
  - Procesos de fundición.
  - Manufactura de:
    - Acero
    - Coke

- Cal
- Cementos
- Cerámicas

#### • Minería y Canteras

- Polvo de las extracciones
- Humos de los vertidos
- Actividades con olores nocivos
  - Despojos de animales
  - Sangre seca
  - Preparación de comidas
  - Cocción de pescados
  - Pegamentos

#### • Procesos químicos

- Polvos y humos
  - No tóxicos
  - Tóxicos:  $\text{Be}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Cd}$
- Gases:  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$

#### • Procesos nucleares

- Desecho radioactivo.
- Gases.

**Tabla N° 2 - Unidades Empleadas para el Monitoreo de la Calidad del Aire**

PARÁMETRO	CLAVE	UNIDAD	RED
Monóxido de Carbono	CO	PPM	
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	PPM	
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	PPM	Monitoreo Automático
Ozono	O <sub>3</sub>	PPM	
Oxidos de nitrógeno	NO <sub>x</sub>	PPM	
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	PPM	
Partículas menores a 10 micras	PM-10	µg/m <sup>3</sup>	
Partículas suspendidas totalmente	PST	µg/m <sup>3</sup>	
Plomo	Pb	µg/m <sup>3</sup>	
Cobre	Cu	µg/m <sup>3</sup>	Monitoreo Manual
Fierro	Fe	µg/m <sup>3</sup>	
Cadmio	Cd	µg/m <sup>3</sup>	
Níquel	Ni	µg/m <sup>3</sup>	
Temperatura	TMP	°C	
Humedad Relativa	RH	% de Humedad Relativa	Monitoreo Meteorológico
Velocidad del viento	WSP	metros por segundo	
Dirección del viento	WDR	grados	

**Fuente:** Adriaansee, A. 1992. The Development of Environmental Policy Indicators in The Netherlands. Ministerio de Vivienda, Planeación Física y Medio Ambiente, Holanda.

### 2.1.8 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES SEGÚN LAS FUENTES DE EMISIÓN

Fuente Emisora	Contaminante	%Relativo	Total
Transporte	CO	77,2	51,4
	Hidrocarburos	13,6	
	NO <sub>x</sub>	7,7	
	Aerosoles	0,8	
	SO <sub>x</sub>	0,7	
Combustión fija	SO <sub>x</sub>	55,0	15,7
	NO <sub>x</sub>	22,6	
	Aerosoles	16,3	
	CO	4,1	
	Hidrocarburos	2,0	
Industria	Aerosoles	36,4	14,1
	CO	30,3	
	SO <sub>x</sub>	18,9	
	Hidrocarburos	13,9	
	NO <sub>x</sub>	0,5	
Otras	CO	44,4	18,8
	Aerosoles	27,8	
	Hidrocarburos	22,4	
	NO <sub>x</sub>	4,9	
	SO <sub>x</sub>	0,5	

### 2.1.9 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES QUÍMICOS

Estado de agregación	Designación	Ejemplos
Gaseoso	Gases	Óxidos de azufre Dióxido de carbono Monóxido de carbono Óxidos de nitrógeno Ozono
	Vapores	Alcoholes Aldehídos, cetonas Derivados halogenados Esteres Hidrocarburos alifáticos Hidrocarburos aromáticos
Líquido	Nieblas	Aceite mineral Ácidos clorhídrico, crómico, sulfúrico Hidróxido sódico
Sólido	Polvos	Asbestos, carbón, caolín Madera, óxidos metálicos, sílice
	Humos	Asfalto, hidrocarburos policíclicos
	Humos metálicos	Aluminio, cadmio, cobre, cromo Estaño, hierro, manganeso Níquel, plomo, silicio, berilio

### **2.1.10 CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES FÍSICOS**

1. Ruidos y vibraciones
2. Tensión térmica:
  1. Altas temperaturas
  2. Bajas temperaturas
3. Radiaciones ionizantes:
  1. Radiaciones
  2. Rayos X
  3. Rayos cósmicos
4. Radiaciones no ionizantes:
  1. Radiaciones ultravioletas
  2. Radiaciones infrarrojas
  3. Microondas
  4. Radiofrecuencias
  5. Láser

### **2.1.11 ASPECTOS DEL DETERIORO DEL AMBIENTE NATURAL**

- ❑ Primero, por la propia actividad del hombre y el cual se conoce como contaminación
- ❑ Segundo, generado por un desastre natural, donde en algunos casos también interviene el hombre como generador del desastre.

### **2.1.12 AGENTES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS**

Sería muy complejo incluir la gran cantidad de factores contaminantes existentes en la biosfera, entre los que se encuentran elementos de todo tipo: partículas, aerosoles, y otros tipos de agentes que contaminan el ambiente. A continuación, se incluye los más importantes y amenazantes

#### **2.1.12.1 ÓXIDOS DE AZUFRE: DIÓXIDO DE AZUFRE Y TRIÓXIDO DE AZUFRE**

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es un gas bastante tóxico para los animales y las plantas. Habitualmente es originado por la combustión de cualquier material, la mayoría de los combustibles remotos conocidos, excepto la madera, contienen alguna proporción de azufre en distintos estados, con una mayor proporción en los carbones de tipo bituminoso.



Este contaminante es un gas incoloro, que produce en elevadas proporciones un efecto irritante en la vista.

Cuando el bióxido de azufre se combina con el oxígeno y el vapor de agua en el aire, se cambia a ácido sulfúrico. Los ácidos formados en la atmósfera caen a la tierra con la lluvia. Esta combinación se conoce como lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno de los vehículos de motor y de las plantas generadoras forman ácido nítrico en la atmósfera y agravan el problema.

Los efectos globales de la lluvia ácida se conocen muy bien. La piedra caliza y el mármol en las estatuas y edificios se disuelven con la lluvia ácida. Las estructuras de metal como los puentes se corroen. La evidencia en los bosques, los ríos, los lagos y las áreas agrícolas, muestra que uno de los efectos a largo plazo de la lluvia ácida es que baja el pH del suelo y el agua. Como resultado, tanto los árboles como los lagos pueden quedarse sin vida.

Las plantas son todavía aun más sensibles que el hombre a su acción tóxica quedando amarillas y muriendo finalmente. A partir del dióxido de azufre puede haber formación en el aire por acción fotoquímica, de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). Este es aún más irritante a las vías respiratorias que el primero. A partir de estos óxidos puede haber reacción espontánea de ácido sulfúrico, responsable por la corrosión de los metales o del concreto.

El *dióxido de azufre* es un gas liberado durante la quema de combustibles que contienen azufre, tales como el aceite y el carbón. Este gas puede causar problemas respiratorios y es un componente principal de la lluvia ácida.

#### **2.1.12.2 OXIDOS DE NITRÓGENO: OXIDO NÍTRICO, DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y ÓXIDO NITROSO**

Los óxidos de nitrógeno más característicos son NO y  $\text{NO}_2$ . Los dos óxidos provienen de procesos de combustión en donde se alcanzan temperaturas muy elevadas, formándose los óxidos dentro del conducto de la chimenea, por combinación de N y del  $\text{O}_2$ .

Los focos emisores del NO y del  $\text{NO}_2$  son los escapes de vehículos automotores, procesos de combustión en la industria de acero, petroquímicas, centrales termoeléctricas, etc. El gran peligro que presentan los óxidos de nitrógeno está vinculado con la acción de la luz solar que incide sobre una atmósfera muy contaminada dando lugar a procesos fotoquímicos, con la producción de contaminantes secundarios de mayor toxicidad, como son el ozono y el nitrato de peroxibenzoílo, este ultimo es un agente cancerígeno.

Es un contaminante que emitido por chimeneas industriales, tiene un color rojizo y al descargarse en una atmósfera saturada de vapor de agua puede dar lugar a la formación de ácido nítrico muy perjudicial para el suelo y el agua donde se halla descargado finalmente. El **smog** se forma cuando el dióxido de nitrógeno producido durante la quema de combustible escapa hacia la atmósfera. El componente más importante del smog es el ozono, un gas que produce irritación de los ojos y problemas respiratorios y disminuye el crecimiento de las plantas.

#### **2.1.12.3 OXIDOS DE CARBONO: MONÓXIDO DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO**

El monóxido de carbono es producido principalmente por los procesos de combustión de vehículos automotores. En forma menos frecuente se puede encontrar en emanaciones de minas carboníferas y emanaciones volcánicas, plantas metalúrgicas en ciertos problemas de tratamiento ácido.

Es un gas incoloro e inodoro muy tóxico para las personas por sus efectos directos sobre el sistema circulatorio y respiratorio, pues la inhalación y fijación de CO en la sangre reduce su capacidad normal para transportar el O<sub>2</sub> necesario con los trastornos conocidos de pesadez, disminución de los reflejos, dolor de cabeza, sofocación, etc. Hasta el extremo de llevar a la persona afectada hasta la muerte si la fijación de CO continúa.

El dióxido de carbono es producido por la combustión de derivados del petróleo, existiendo en la atmósfera terrestre como constituyente del aire. No es un gas tóxico, no produce efectos acumulativos en el organismo. Puede llegar a ser muy abundante en ciudades de la densidad de población debido a focos puntuales (chimeneas de generadores domésticos) y escapes de vehículos automotores.

#### **2.1.12.4 HIDROCARBUROS**

Los hidrocarburos corresponden a la familia que contiene carbono e hidrógeno, tales como metano y acetileno. Los combustibles fósiles, especialmente el carbón, liberan contaminantes a medida que se queman. El azufre que se encuentra, frecuentemente en el carbón, se combina con el oxígeno y produce un humo con un olor desagradable. A medida que se quema, el carbón también libera una gran cantidad de hollín o partículas de carbón sin quemar.

A principios de siglo XX, algunas industrias cambiaron su fuente de energía de carbón a petróleo, que quema más limpio, y a gas natural. El aire se hizo más limpio. Años más tarde, con el uso del automóvil, se usaron otros tipos de contaminantes.

El motor del automóvil no quema la gasolina completamente. Como resultado, se añaden al aire el monóxido de carbono y las moléculas de hidrocarburos. También se producen varios compuestos de nitrógeno y azufre. Estos materiales son todos tóxicos.

Los contaminantes de las emanaciones de los automóviles sufren reacciones químicas en el aire y forman el Smog (nieblumo). La luz solar provee energía para estas reacciones; por eso el nombre de smog fotoquímico.

#### **2.1.12.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)**

En esta categoría de contaminantes se incluyen los compuestos orgánicos distintos de los hidrocarburos, en cuyas moléculas hay uno o varios átomos diferentes a carbón e hidrógeno, tales como aldehídos, cetonas, derivados halógenos, ácidos orgánicos entre otros, y a todos los contaminantes perdidos por evaporación de solventes orgánicos, de bajo peso molecular. Las principales fuentes de emisión son los procesos industriales donde se sintetizan pintura, lacas, etc.

#### **2.1.12.6 MATERIA PARTICULADA SUSPENDIDA (MPS)**

Las *partículas en suspensión* son piezas de ceniza, polen, asbesto, humo, hollín, polvo, plomo, arsénico, cadmio y sales de nitrato y sulfato, así como gotículas de sustancias químicas líquidas como el ácido sulfúrico, petróleo, dioxinas y plaguicidas que son liberadas durante los procesos industriales, prácticas agrícolas o quema de combustibles. Las partículas más pequeñas que permanecen flotando en el aire por varios días pueden alojarse en los pulmones y contribuir a enfermedades respiratorias.

El plomo es el más peligroso y tóxico derivado de la gasolina que en general se encuentra en proporciones muy bajas debido, en buena parte la reglamentación existente en las grandes ciudades referente al máximo contenido de plomo en la gasolina de consumo normal.

Las ciudades producen una gran cantidad de contaminantes del aire. Usualmente, el aire cerca de la superficie de la tierra es caliente. Como el aire caliente es menos denso que el aire frío, tiende a subir. Estas corrientes de aire que suben, junto con los

vientos, se llevan muchos contaminantes. Cuando una capa de aire caliente reemplaza el aire frío, ocurre la Inversión térmica.

Uno de los mayores efectos de la contaminación del aire se llama el “efecto invernadero”. La energía del sol calienta la Tierra. La atmósfera actúa como el cristal de un invernadero y retiene el calor. La cantidad de bióxido de carbono en la atmósfera está aumentando, mayormente debido a las grandes cantidades de combustibles que se queman. El bióxido de carbono aumenta el efecto de atrapar el calor de la atmósfera.

El aumento en el bióxido de carbono puede llevar a un aumento gradual en la temperatura mundial. Hay otra evidencia, sin embargo, que muestra que la temperatura de la Tierra está descendiendo gradualmente. Los investigadores creen que esto se debe a grandes aumentos en la cantidad de polvo y otras partículas en la atmósfera. Estas partículas reflejan la energía solar hacia exterior de la Tierra.

### **2.1.13 FUENTES CONTAMINANTES**

Los contaminantes aéreos pueden también causar efectos indirectos sobre el ecosistema, en la medida que causan aumentos en la temperatura, cambios en el PH y disminución de la capa de ozono.

Para una evaluación acertada del problema de contaminación es necesario tomar en cuenta cuáles son las fuentes contaminantes. Las fuentes pueden ser de tres tipos:

- a. Fuentes fijas: Chimeneas de las industrias
- b. Fuentes móviles: Automóviles y vehículos de transporte público
- c. Fuentes grupales: chimeneas o emisiones de hogares.

Es importante además considerar que muchas veces los contaminantes pueden estar distribuidos uniformemente, esto es, que la ubicación espacial de la fuente emisora es irrelevante. Otras veces, en cambio, los contaminantes están concentrados en ciertas zonas, creando focos críticos como en el caso del centro de Lima.

#### **2.1.14 Modelo de Emisiones Evaporables y de Tubos de Escape de Vehículos con Motor de Gasolina en Condiciones Específicas de Clima, de Conducción de Vehículos y de Volatilidad de La Gasolina**

Los vehículos ligeros con motor a gasolina son la fuente principal de emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, y COV (compuestos orgánicos volátiles) en las mayorías de las grandes zonas urbanas. Estos tres contaminantes son precursores del smog fotoquímico que aparece con mayor frecuencia e intensidad en muchas regiones y afecta a gran parte de la población.

El smog fotoquímico (ozono, dióxido de nitrógeno y otras sustancias en cantidades pequeñas) se forma a partir de los contaminantes principales NO<sub>x</sub>, CO y COV mediante reacciones atmosféricas por influencia de la luz solar y el calor. La velocidad de las reacciones que conducen del smog se incrementa significativamente en el verano, cuando la intensidad de la luz solar y la temperatura se elevan.

Los factores de emisión de NO<sub>x</sub>, CO y COV dependen en gran medida de la temperatura media diaria y de los patrones de conducción de vehículos (velocidad promedio, porcentaje de arranques del motor en frío y longitud media de cada viaje). Durante los meses pico de ozono dichos parámetros pueden desviarse considerablemente de sus promedios anuales (la temperatura es más alta) e inclusive pueden desviarse más de las condiciones típicas.

##### **2.1.14.1 Modelo de Emisiones de Tubos de Escape (E)**

Este modelo es capaz de predecir emisiones para todo tipo de vehículos ligeros con motor a gasolina, se utiliza en el análisis de las emisiones de tubos de escape sobre los parámetros conocidos tales como, la temperatura media diaria o estacional, velocidad promedio (**V**) del vehículo, la fracción de arranque del motor en frío y longitud media de cada viaje (**L**), la edad de un vehículo convencional o el tipo de sistema catalítico y el desplazamiento del cilindro respecto al motor.

El Modelo de Emisiones de Tubos de Escape, adopta la forma siguiente:

$$e = d * m \quad \text{( Fórmula 1 )}$$

Donde **V** y **L** pueden ser:

<b>d</b>	<b>m</b>
Velocidad promedio (V)	Temperatura media
Desplazamiento del cilindro	Longitud promedio del viaje (L)
Año de fabricación del vehículo	Tecnología catalítica o convencional

**m**: Multiplicador del factor de consumo de combustible y Multiplicador del factor de emisión de contaminante.

**d**: Factor de emisión de arranque en caliente y Factor de Consumo de Combustible

**e**: Emisión real

Los factores de consumo de combustible y emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y COV, se dan a continuación:

**Tabla 3:**  
**FACTORES DE EMISIÓN CON ARRANQUE EN CALIENTE**  
**PARA VEHÍCULOS LIGEROS**

Velocidad (km/h)	Óxidos de Nitrógeno NO <sub>x</sub> (gr/km)			Monóxido de Carbono CO (gr/km)	Compuestos Orgánicos Volátiles COV (gr/km)
	< 1400 cc	1400-2000 cc	> 2000 cc		
10	<b>1.30</b>	1.90	2.25	<b>20.80</b>	<b>3.55</b>
20	1.40	1.95	2.45	10.65	2.35
30	1.55	2.00	2.65	10.10	1.70
40	1.70	2.10	2.85	8.00	1.40
50	1.85	2.20	3.05	7.00	1.20
60	2.00	2.30	3.30	6.50	0.90
70	2.20	2.45	3.55	5.00	0.80
80	2.45	2.60	3.80	3.50	0.75
90	2.65	2.75	4.05	3.50	0.70
100	2.85	2.95	4.30	5.00	0.65
110	3.05	3.20	4.55	6.50	0.70
120	3.25	3.45	4.80	7.00	0.75
130	3.50	3.75	5.05	10.00	0.80
140	3.75	4.05	5.40	15.00	0.90
150	4.00	4.40	5.65	20.00	1.00

**Fuente:** Environment Canada. 1996. Canada's National Environmental Indicators

**Tabla 4**  
**FACTORES DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE CON ARRANQUE EN CALIENTE**  
**PARA VEHÍCULOS LIGEROS**

Velocidad (km/h)	Factores de Consumo de Combustible FCC (gr/km)		
	< 1400 cc	1400-2000 cc	> 2000 cc
10	106	156	175
20	66	84	100
30	<b>56</b>	64	75
40	44	54	65
50	40	50	60
60	38	48	55
70	40	46	55
80	42	48	60
90	46	50	65
100	48	54	65
110	54	60	70
120	58	66	75
130	66	72	80
140	72	82	85
150	78	90	90

**Fuente:** . Environment Canada. 1996. Canada's National Environmental Indicators

Estos factores representan las emisiones y el consumo de combustible para las distancias recorridas cuando el motor está caliente (temperatura del líquido refrigerante superior a los 70°C).

Cuando el vehículo se desplaza con el motor en frío, sus emisiones y consumo de combustible son diferentes de cuando arranca en caliente. Como la mayoría de los vehículos se enciende con el motor en frío y recorren una distancia regular de su recorrido promedio antes de que el motor se caliente, se debe corregir el factor de consumo de combustible y emisiones de arranques en caliente **d** para compensar los efectos de los arranques en frío; considerando **m = 0.75**, cuando no haya datos locales.

Para la estimación de la emisión real (compensación de arranque en frío) y el factor de consumo de combustible **e**, se requieren los valores de **m**, que se dan en la tabla siguiente:

**Tabla 5**  
**MULTIPLICADORES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES**

Multiplicador del Factor de Emisión de <b>NO<sub>x</sub></b>						
Temperatura (°C)	Longitud del viaje L (km)					
	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 12	L = 14
- 10	1.075	1.068	1.061	1.054	1.048	1.040
0	1.042	1.037	1.033	1.030	1.025	1.022
10	1.015	1.014	1.013	1.010	1.009	1.008
20	0.996	0.9965	<b>0.997</b>	0.9975	0.998	0.9985
30	0.981	0.983	0.985	0.987	0.988	0.999
40	0.981	0.983	0.985	0.987	0.988	0.999
Multiplicador del Factor de Emisión de <b>CO</b>						
Temperatura (°C)	Longitud del viaje L (km)					
	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 12	L = 14
- 10	2.88	2.72	2.54	2.36	2.18	2.00
0	2.22	2.10	2.00	1.88	1.76	1.64
10	1.70	1.64	1.58	1.50	1.42	1.36
20	1.28	1.26	<b>1.24</b>	1.22	1.18	1.16
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Multiplicador del Factor de Emisión de <b>COV</b>						
Temperatura (°C)	Longitud del viaje L (km)					
	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 12	L = 14
- 10	2.04	1.94	1.84	1.76	1.66	1.56
0	1.72	1.66	1.58	1.52	1.44	1.38
10	1.46	1.40	1.36	1.32	1.28	1.24
20	1.24	1.21	<b>1.18</b>	1.16	1.14	1.12
30	1.080	1.070	1.060	1.050	1.040	1.030
40	1.080	1.070	1.060	1.050	1.040	1.030

**Fuente:** . Environment Canada. 1996. Canada's National Environmental Indicators



**Tabla 6**  
**MULTIPLICADOR DEL FACTOR DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE**

Temperatura (°C)	Longitud del viaje L (km)					
	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 12	L = 14
- 10	1.26	1.24	1.21	1.19	1.16	1.14
0	1.18	1.17	1.15	1.13	1.11	1.10
10	1.12	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07
20	1.075	1.065	<b>1.060</b>	1.050	1.045	1.040
30	1.035	1.030	1.025	1.020	1.015	1.010
40	1.035	1.030	1.025	1.020	1.015	1.010

**Tabla 7**  
**EVALUACIÓN DE CARGAS DE EMISIONES DE CONTAMINANTES**

Fuente	Unidad (U)	Tamaño de la Fuente 10 <sup>3</sup> U/año	NO <sub>x</sub>		CO		COV	
			Facto r Kg/U	Carg a t/año	Facto r Kg/U	Carg a t/año	Facto r Kg/U	Carg a t/año
Motor < 1400cc	1,000 km	15	1.30	19.5	20.80	312.0	3.55	53.3
		15	1.40	21.0	10.65	159.8	2.35	35.3
		15	1.55	23.3	10.10	151.5	1.70	25.5
Subtotal				63.8		623.3		114.1
<b>NO<sub>x</sub>:</b> Óxidos de Nitrógeno, <b>CO:</b> Monóxido de Carbono, <b>COV:</b> Compuestos Orgánicos Volátiles								

Utilizando la Tabla 3, la Carga de Contaminante se mide con la fórmula siguiente:

$$Carg a = \text{Tamaño de la Fuente} \times \text{Factor de Emisión}$$

**EJM:**       $Carg a = 15 * 1.30 \Rightarrow Carg a = 19.5 \text{ toneladas / año}$

### 2.1.14.2 MODELO DE EMISIONES EVAPORABLES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)

El modelo de emisiones evaporables de **COV** para vehículos ligeros con motor a gasolina permite la evaluación cualitativa del impacto de las condiciones locales climáticas y de la volatilidad de la gasolina.

Según el modelo anterior, las emisiones evaporables de **COV** se dividen en tres categorías: pérdidas por difusión de calor, que ocurren cuando se apaga el motor en caliente debido a la evaporación del combustible; pérdidas durante el recorrido, que ocurren cuando está en movimiento; y pérdidas diurnas, que ocurren cuando el vehículo está detenido con el motor apagado (expansión y emisión de vapor principalmente del tanque de combustible debido a las variaciones diarias de la temperatura diurna del ambiente).

Los factores de emisión para las tres categorías dependen de la temperatura promedio anual, estacional o diaria,  $T_{media}$  en °C, así como la volatilidad de la gasolina de acuerdo con lo expresado por la presión del vapor (**PV**, medida de vapor estandarizada que se hace con 38°C y una razón vapor líquido de 4:1), **PV** en Kilogramo de presión (kp). Así mismo, las emisiones por difusión de calor por Km dependen de la variación de la temperatura promedio diaria, estacional o anual de referencia en °C.

Los factores de emisión para las pérdidas por difusión de calor y durante el recorrido se dan en las **Tablas 8-9** como una función de  $T_{media}$ , **PV** de gasolina y  $L_{viaje}$  como g/km (o como kg/1,000 km). El factor de emisión para las pérdidas diurnas  $e_{diurna}$ , expresadas como kg/(carro\*año), se pueden estimar fácilmente de la ecuación siguiente:

$$e_{diurna} = -9.125 + 0.1862 * TD + 0.2263 * \left( T_{media} + \frac{TD}{2} \right) + 0.0803 * PV$$

#### Fórmula 2

Donde:  $TD$  : *Temperatura Diurna*

$T_{media}$  : *Temperatura Media*

$PV$  : *Presión de Vapor*

Tabla 8

**PÉRDIDA DE COMBUSTIBLE POR DIFUSIÓN DE CALOR DURANTE EL  
RECORRIDO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DE LA  
VOLATILIDAD  
PARA VEHÍCULOS PEQUEÑOS ( < 1,400 C.C. )**

Temperatura Media $T_{media}$ (°C)		Presión de Vapor PV (kp) g/Km.					
		60	70	80	90	100	120
Emisión de Contaminantes por difusión de calor	- 10.0				0.765/L	1.00/L	1.59/L
	- 5.0				0.824/L	1.03/L	1.47/L
	- 0.0		0.412/L	0.647/L	0.824/L	1.09/L	1.79/L
	5.0		0.441/L	0.676/L	0.882/L	1.24L	2.06/L
	10.0	0.500/L	0.529/L	0.794/L	1.03/L		
	15.0	0.706/L	0.706/L	1.03/L			
	20.0	0.971/L	<b>1.12/L</b>	1.59/L			
	25.0	1.38/L	1.94/L	2.47/L			
Pérdida de Combustible durante el recorrido	- 10.0				0.0125	0.0175	0.0274
	- 5.0				0.0125	0.0175	0.0299
	- 0.0		0.0075	0.01	0.015	0.02	0.0324
	5.0		0.0075	0.0125	0.015	0.02	0.0349
	10.0	0.075	0.01	0.0125	0.0175		
	15.0	0.0125	0.0125	0.0175			
	20.0	0.0175	<b>0.02</b>	0.0274			
	25.0	0.02	0.03	0.052			

Tabla 9

**PÉRDIDA DE COMBUSTIBLE POR DIFUSIÓN DE CALOR DURANTE EL  
RECORRIDO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DE LA  
VOLATILIDAD  
PARA VEHÍCULOS PEQUEÑOS ( > 1,400 C.C. )**

Temperatura Media $T_{media}$ (°C)		Presión de Vapor PV (kp) g/Km.					
		60	70	80	90	100	120
Emisión de Contaminantes por difusión de calor	- 10.0				1.47/L	1.76/L	2.44/L
	- 5.0				1.47/L	1.94/L	2.94/L
	- 0.0		0.794/L	1.24/L	1.71/L	2.21/L	3.53/L
	5.0		0.853/L	1.35/L	1.88/L	2.50/L	4.24/L
	10.0	0.882/L	0.971/L	1.56/L	2.29/L		
	15.0	1.15/L	1.29/L	2.00/L			
	20.0	1.59/L	<b>1.94/L</b>	2.94/L			
	25.0	2.21/L	3.18/L	4.44/L			
Pérdida de Combustible durante el recorrido	- 10.0				0.033	0.04	0.056
	- 5.0				0.033	0.047	0.066
	- 0.0		0.02	0.027	0.04	0.05	0.083
	5.0		0.02	0.03	0.043	0.056	0.1
	10.0	0.02	0.023	0.037	0.053		
	15.0	0.023	0.03	0.047			
	20.0	0.033	<b>0.047</b>	0.066			
	25.0	0.05	0.073	0.096			

**Fuente:** . Environment Canada. 1996. Canada's National Environmental Indicators

A continuación se hace una breve referencia teórica respecto a la Programación Lineal y Simulación, herramientas de la Investigación Operativa a ser aplicadas en ésta tesis.

### 2.1.15 PROGRAMACIÓN LINEAL

La Programación Lineal es una técnica de la Investigación de Operaciones que se utiliza en la solución de problemas en los que desea optimizar (maximizar o minimizar) una función lineal de una o más variables, llamada función objetivo, sujeta a ciertas limitaciones (restricciones, las cuales son funciones lineales).

#### Formas de un Modelo de Programación Lineal (MPL)

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sujeto a

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$$

$$x_j \geq 0$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$\text{Max} \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sujeto a

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$$

$$x_j \geq 0$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, n$$

Donde:

Función Objetivo :  $\sum_{j=1}^n c_j x_j$

Restricciones :  $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad \text{ó} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$

Variables :  $x_j \geq 0$

### 2.1.16 SIMULACIÓN

Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema y experimentar con éste modelo con el objetivo de entender el comportamiento del sistema o evaluar diversas estrategias con las cuales puede operarse el sistema.

## 2.2 MARCO REFERENCIAL

### 2.2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LIMA

La medición y vigilancia de la contaminación atmosférica en Lima Metropolitana está a cargo del proyecto **VICON**, un proyecto dirigido por el **SENAHMI**. En este proyecto se trabaja con dos tipos de contaminantes atmosféricos: los contaminantes sólidos sedimentables y los contaminantes en suspensión.

Los contaminantes sólidos sedimentables son aquellos que caen en los techos, en las pistas e incluso en la ropa y en el rostro de las personas. Entre los principales contaminantes de este tipo se encuentran el azufre, calcio, cadmio, cromo, magnesio, manganeso, sodio, plomo, potasio y zinc.

Según mediciones efectuadas los valores medios de los contaminantes sólidos sedimentables en Lima Metropolitana exceden el límite máximo permisible por la Organización Mundial de Salud (OMS). Este límite es de 5 toneladas por kilómetro cuadrado en 30 días ( $T/Km^2/30días$ ); sin embargo, entre Julio de 1,998 y Noviembre de 1,999, el menor valor registrado en Lima fue de  $7.5 T/Km^2/30días$  y el mayor valor registrado fue de  $12.5 T/Km^2/30días$

### 2.2.2 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AIRE

Un sumario de datos (criterios o estándares) de calidad del aire-ambiente han sido establecidos:

- Materia de Partículas de 10 micrones o menos en diámetro ( $PM_{10}$ )
- Plomo (Pb)
- Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ) - medidos como  $SO_2$
- Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) - medidos como  $NO_2$
- Ozono ( $O_3$ )
- Monóxido de Carbono (CO)

**TABLA 10 - VALORES NORMADOS PARA LOS CONTAMINANTES**

Contaminante	Exposición aguda		Exposición Crónica
	Concentración y tiempo Promedio	Frecuencia máxima aceptable	(Para protección de la salud de la población susceptible)
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1 hora)	1 vez cada 3 años	-
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas)	1 vez al año	-
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)
Partículas fracción respirable (PM10)	150 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética 3 meses)

**TABLA 11 - Puntos de quiebre para el IMECA**

IMECA	PST (24hr) µg/m <sup>3</sup>	PM10 (24hr) µg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> (24hr) ppm	NO <sub>2</sub> (1hr) ppm	CO (8hr) ppm	O <sub>3</sub> (1hr) ppm
100	260	150	0.13	0.21	11	0.11
200	546	350	0.35	0.66	22	0.23
300	627	420	0.56	1.1	31	0.35
400	864	510	0.78	1.6	41	0.48
500	1000	600	1	2	50	0.6

Fuente: Ministerio de Transporte Junio 2,004

**TABLA 12 - Población de Lima afectada por padecimiento**

Padecimiento	Horas	Porcentaje de la población
Disnea	1-2	7.9
	3 y más	8.1
Odinofagia	1- 2	8.5
	3 y más	9.6
Cefalea	1-2	15.0
	3 y más	22.5
Conjuntivitis	1-2	7.3
	3 y más	8.9
Tos productiva	1-2	8.5
	3 y más	12.4
Disfonía	1-2	8.9
	3 y más	9.6

Tabla 13

**Población de la Lima afectada por padecimiento  
a las 24 horas de iniciada la contingencia, según niveles de IMECA**

<b>Padecimiento</b>	<b>Niveles de IMECA</b>	<b>Porcentaje de la población</b>
Odinofagia	150-199	12.7
	200-249	15.6
	250 y más	18.0
Cefalea	150-199	13.3
	200-249	13.8
	250 y más	15.5
Conjuntivitis	150-199	7.2
	200-249	6.3
	250 y más	10.7
Tos productiva	150-199	6.3
	200-249	8.7
	250 y más	10.4
Disnea	150-199	4.7
	200-249	6.0
	250 y más	7.9
Disfonía	150-199	6.1
	200-249	8.2
	250y más	11.0
Fuente: Ministerio de Transporte: Junio 2004		

TABLA 14

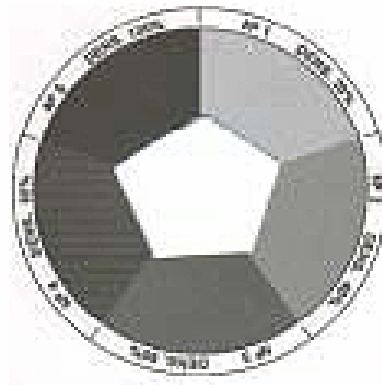
**Población de Lima afectada por padecimiento, según niveles de IMECA**

<b>Padecimiento</b>	<b>Niveles de imecas I</b>	<b>Porcentaje de la población</b>
Disnea	250-299	7.1
	300 y más	8.3
Odinofagia	250-299	16.1
	300 y más	18.2
Cefalea	250-299	16.0
	300 y más	18.7
Conjuntivitis	250-299	7.6
	300 y más	8.0
Tos productiva	250-299	9.2
	300 y más	9.2
Disfonía	250-299	8.0
	300 y más	9.1
Fuente: Ministerio de Transporte: Junio 2004		



### 2.2.3 LA TARJETA RINGELMANN

La Tarjeta Negra es una adaptación de un instrumento llamado Tarjeta **Ringelmann**, que mide los humos de los vehículos que usan petróleo como combustible. La Tarjeta Negra posee una escala de tonos grises, los que ayudan a saber si un vehículo contamina. Observando a través de su orificio pueden identificarse los humos que emiten los vehículos al circular por la vía pública. Cuando el humo es negro, la tarjeta indica "Peligroso" y cuando es de tono gris indica "Aceptable". También incluye los niveles "Muy Malo", "Malo" y "Regular", respectivamente



## 2.3 MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del proyecto es necesario detallar los siguientes conceptos sobre la contaminación del aire:

### 2.3.1 CONCEPTOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

### 2.3.1 CONCEPTOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

<b>Ácido nítrico</b>	Ácido obtenido por la oxidación y reacción con agua de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en la atmósfera. Es un componente importante de las lluvias ácidas. Fórmula: $\text{HNO}_3$ .
<b>Ácido sulfúrico</b>	Ácido obtenido por oxidación de dióxido de azufre en presencia de humedad. Componente principal de la lluvia ácida. Fórmula: $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
<b>Adiabáticos</b>	Un cambio de la temperatura de una masa de aire como resultado de los cambios de presión dentro de la masa de aire que hace que se expanda o contraiga sin ganancia ni pérdida de energía.
<b>Advección</b>	El movimiento horizontal de aire, humedad o calor.
<b>Aerosol</b>	Una masa constituida por partículas sólidas o líquidas dispersas en el aire.
<b>Agroquímicos</b>	Productos químicos que se usan en la agricultura. Ejemplos: abonos y plaguicidas.
<b>Aire Polar</b>	Una masa de aire cuyas características se generan sobre la tundra o sobre terrenos cubiertos de nieve y de elevada latitud.
<b>Aire Saturado</b>	Aire que contiene la máxima cantidad de vapor de agua que puede retener a una presión y a una temperatura dadas. El aire saturado tiene una humedad relativa del 100%.
<b>Alta</b>	Una zona de alta presión atmosférica dentro de un sistema de circulación cerrado —un anticiclón.
<b>Alta Estacionaria</b>	Cualquier centro de alta presión que se mantenga estacionario y bloquee completamente durante varios días el normal avance hacia el Este de los sistemas meteorológicos en las latitudes medias.
<b>Alvéolo</b>	Pequeña cavidad pulmonar que contiene aire. Éste cede oxígeno a la sangre y recibe de ellas dióxido de carbono para ser exhalado. El pulmón de un hombre tiene unas 300 millones de alvéolos.

<b>Anticiclón</b>	Circulación de aire alrededor de un área central de altas presiones que está relacionado, normalmente, con tiempo estable; la presión se eleva sostenidamente cuando se está desarrollando un anticiclón y desciende cuando está desapareciendo.
<b>Benzopireno</b>	Sustancia presente en breas de carbón y en humo del tabaco. Es un producto cancerígeno.
<b>Biodiversidad</b>	Variedad de organismos vivos en un área determinada.
<b>Biosfera</b>	La parte viva de la Tierra que interactúa con todos los demás procesos geológicos y biológicos.
<b>Butano</b>	Hidrocarburo volátil que forma parte del gas natural. Fórmula: $C_4H_{10}$ .
<b>Cadmio</b>	Metal brillante de amplio uso en aleaciones y en algunos tipos de baterías. Presente en pequeñísimas cantidades en el humo del tabaco. Causa intoxicaciones por ingestión o inhalación de él o de sus compuestos. Símbolo: Cd.
<b>Catalizador</b>	Sustancia que modifica la velocidad de una reacción química, sin consumirse en ella.
<b>Casquete Polar</b>	Cubierta de hielo y nieve en los polos.
<b>Cefalea</b>	Dolor de cabeza
<b>Cesio</b>	Metal blanco-plateado, presente en baja concentración en la corteza terrestre. Símbolo: Cs. El cesio 134 es uno de los isótopos radiactivos.
<b>Ceniza Volcánica</b>	Material piroclástico diminuto que es lanzado a la atmósfera por un volcán en erupción.
<b>CFC</b>	Compuesto o compuestos clorofluorocarbonados de amplio uso en la industria. Su producción se está restringiendo por su efecto negativo sobre la capa protectora de ozono.
<b>Ciclo de Carbono</b>	El recorrido de carbono en la atmósfera y el océano. El carbono se convierte en rocas carbonatadas y reaparece en las erupciones de los volcanes.
<b>Ciclo del Nitrógeno</b>	El recorrido del nitrógeno desde la atmósfera a los organismos vivos y de vuelta a la atmósfera cuando mueren los organismos.
<b>Ciclón</b>	La circulación de aire alrededor de una zona central de baja presión que está relacionada, generalmente, con tiempo inestable. En latitudes tropicales se puede referir a una fuerte tormenta que no alcanza el carácter de huracán.

<b>Ciclón Tropical</b>	Una zona de baja presión con origen en los trópicos, tiene un núcleo central caliente y generalmente desarrolla un ojo.
<b>Circulación</b>	La distribución de los flujos del aire o el agua en movimiento.
<b>Combustión</b>	Proceso de oxidación habitualmente de compuestos orgánicos en presencia de oxígeno, acompañado por liberación de calor.
<b>Conjuntivitis</b>	Inflamación de la conjuntiva
<b>Contaminante</b>	Cualquier sustancia que contamina el aire o el agua, ya sea de origen artificial o natural.
<b>Convección</b>	Un flujo vertical y circular de un medio fluido debido al calentamiento de la parte inferior. Cuando un material se calienta se vuelve menos denso y se eleva, mientras que el material más frío y más pesado se hunde.
<b>Convergencia</b>	Una distribución del movimiento del viento que produce un influjo neto de aire en una zona de, por ejemplo, bajas presiones.
<b>Corriente de Aire</b>	Un cuerpo considerable de aire con las mismas características que fluye con la circulación general.
<b>Corriente descendente</b>	Un fluido frío se hunde porque pesa más que el medio que le rodea.
<b>Crecimiento demográfico</b>	Aumento de la población humana.
<b>Densidad</b>	El número de alguna cantidad por unidad de volumen.
<b>Desgasificación espontánea</b>	La pérdida de gas dentro de un planeta, a diferencia de desgasificación, que es la pérdida de gas de los meteoritos.
<b>Dióxido de azufre</b>	Producto gaseoso de la combustión de compuestos que contiene azufre, de olor sofocante fuerte. Se oxida en la atmósfera húmeda y se transforma en ácido sulfúrico.
<b>Disfonía</b>	Perturbación de la intensidad, tono y timbre de la voz.
<b>Disnea</b>	Insuficiencia respiratoria.
<b>Efecto Invernadero</b>	Efecto de calentamiento mundial que produce la atmósfera cuando es más transparente a la entrada de radiación solar de onda corta que a la salida de radiación de onda larga.
<b>Efluente</b>	Corriente de líquido o gas que sale de un sistema.
<b>Eólico</b>	Depósito de sedimentos arrastrados por el viento.
<b>Escarcha</b>	Cristales de hielo que se forman sobre la hierba u otros objetos por la sublimación del vapor de agua del aire a temperatura inferior a la de congelación.
<b>Espora</b>	Estructura de reproducción o de resistencia de organismos primitivos como los hongos.

<b>Estratosfera</b>	Capa superior de la atmósfera sobre la troposfera que se localiza entre los 18 y los 48 kilómetros sobre la superficie de la Tierra. El aire en esta capa es estable normalmente y la temperatura decrece con la altura.
<b>Evaporación</b>	Transformación de un líquido en gas.
<b>Exosfera</b>	La parte más exterior de la atmósfera que está en contacto con el espacio.
<b>Formaldehído</b>	Gas presente en la combustión incompleta de material orgánico. Se encuentra como contaminante en el aire de las ciudades. Tiene un olor fuerte y sofocante. Irrita la mucosa, su solución en aguas es conocida comúnmente como formol.
<b>Fósil</b>	Cualquier resto, impresión o traza en roca de una planta o animal de una época geológica anterior.
<b>Fotooxidación</b>	Oxidación favorecida por la acción de la luz.
<b>Fotosíntesis</b>	Proceso por el cual las plantas crean hidratos de carbono a partir de dióxido de carbono, agua y luz solar.
<b>Frente Cálido</b>	Límite de una corriente en avance de aire relativamente caliente que está desplazando una masa de aire más frío en retroceso
<b>Frente Frío</b>	Zona de transición entre el aire frío en avance y el aire caliente en retirada.
<b>Frente Polar</b>	Discontinuidad semipermanente que separa los fríos vientos polares del Este de los vientos relativamente calientes del Oeste de las latitudes medias.
<b>Glaciación</b>	Período de tiempo en el que grandes zonas de la Tierra estuvieron cubiertas por glaciares.
<b>Glaciar</b>	Gruesa masa de hielo en movimiento que se da donde la aportación de nieve del invierno excede a lo que se derrite en verano.
<b>Hemoglobina</b>	Proteína que da el color rojo a la sangre y que realiza el transporte de oxígeno hacia los tejidos.
<b>Hidrógeno</b>	Gas incoloro e inodoro, que puede reaccionar violentamente con el aire o con oxígeno. Formula: H <sub>2</sub> .
<b>Hidrocarburo</b>	Una molécula que está formada por cadenas de carbono con átomos de hidrógeno adheridos.
<b>Hidrósfera</b>	La capa de agua sobre la superficie de la Tierra.
<b>Hoja acicalada</b>	Hoja en forma de aguja.

<b>Hoja caduca</b>	Renovada todos los años. Se caen en otoño y nuevas hojas salen en primavera.
<b>Hoja perenne</b>	Hoja que no se renueva (en general) como la los pinos y abetos. Estos árboles sólo pierden un 10% de sus hojas cada año.
<b>Humedad Relativa</b>	La proporción entre la cantidad de humedad en el aire y la cantidad de humedad que el aire podría contener a esa misma presión y temperatura si estuviera saturado. Se expresa normalmente como un tanto por ciento.
<b>Infrarroja</b>	Radiación de calor con una longitud de onda entre la luz roja y las ondas de radio.
<b>Insolación</b>	Toda la radiación solar que recibe la Tierra.
<b>Interglacial</b>	Periodo de calentamiento entre dos periodos glaciares.
<b>Inversión</b>	Cambio del valor de una propiedad atmosférica del descenso o el ascenso que acompaña usualmente al aumento de la altitud.
<b>Inversión de temperatura</b>	Capa de la atmósfera en la cual la temperatura aumenta con la altitud en vez de seguir la tendencia normal de la temperatura a decrecer con la altitud.
<b>Isótopos</b>	Átomo de un mismo elemento que contiene distinto número de neutrones.
<b>Masa de Aire</b>	Un gran cuerpo de aire cuya distribución horizontal de temperaturas y de humedad son casi uniformes.
<b>Mesósfera</b>	Zona de la atmósfera de la Tierra situada entre la estratosfera y la termosfera, que abarca desde los 38 hasta los 64 kilómetros sobre la superficie de la Tierra.
<b>Metano</b>	Gas que forma parte del gas combustible. Se genera también en los biodigestores, en los pantanos y durante la digestión de los rumiantes. Fórmula: CH <sub>4</sub> .
<b>Monitorear</b>	Seguir periódicamente con mediciones la presencia de algunos componentes. En este caso, de un contaminante.
<b>Monóxido de carbono</b>	Gas producido por la combustión incompleta de carbón o de sustancias orgánicas. Se produce como contaminante en las ciudades, especialmente por los automóviles. También durante los incendios forestales.
<b>Monzón</b>	Viento estacional acompañado de cambios de temperatura, que sopla sobre la tierra y el mar de una estación de un año a otro.
<b>Odinofagia</b>	Deglución dolorosa.

<b>Onda electromagnética</b>	Proceso por el cual se propaga energía (por ejemplo, la de la luz visible, rayos x, ondas de radio, etc.)
<b>Óxidos de nitrógeno</b>	Gases producidos por oxidación a altas temperaturas del nitrógeno del aire. Formula: $\text{No}_x$ .
<b>Ozono</b>	Molécula formada por tres átomos de oxígeno. Formula: $\text{O}_3$ .
<b>PAN</b>	Nitrato de peroxiacetilo. Sustancia que se genera a partir de los gases de los escapes de los autos en presencia de oxígeno y luz. Se forma junto con el ozono. Su concentración es más fácil de medir que la del ozono y la contaminación fotoquímica se expresa por esto en PAN.
<b>pH</b>	Medida de la acidez o basicidad de una solución. Se indica con una escala cuyos valores usuales van de 0 a 14. El valor 7 corresponde al agua pura y las soluciones neutras
<b>PPM</b>	Partes por millón. equivale, por ejemplo, a un gramo en una tonelada.
<b>Precipitación</b>	Resultado de la condensación que cae desde las nubes como lluvia, nieve, granizo o aguanieve.
<b>Precipitación Ácida</b>	Tipo de precipitación con niveles anormalmente elevados de ácidos sulfúrico y nítrico.
<b>Presión atmosférica</b>	Peso por unidad de superficie de la masa total de aire sobre un punto dado, también llamada presión barométrica.
<b>Propano</b>	Sustancia que se encuentra en el gas natural. Formula: $\text{C}_3\text{H}_8$ .
<b>Plomo</b>	Metal pesado, grisáceo, maleable. Símbolo: Pb.
<b>Radiación</b>	Proceso mediante el cual se propaga la energía proveniente del Sol a través del vacío del espacio mediante ondas electromagnéticas. Un sistema de transporte de calor; otros son la convección y la conducción.
<b>Radón</b>	Gas radiactivo que se forma en la descomposición de rocas y minerales que contiene uranio. Está ampliamente distribuido en suelos y materiales de construcción. Símbolo: Rn.
<b>Smog</b>	Niebla espesa y oscura como humo, resultado de la contaminación fotoquímica. <b>Smoke</b> : humo, <b>Fog</b> : Niebla
<b>Smog fotoquímico</b>	Uno de los tipos de smog, generado por gases contaminantes en presencia de la luz solar.
<b>Temperatura media</b>	Media aritmética de las series de temperaturas observadas; durante un cierto periodo de tiempo.
<b>Tos productiva</b>	Secreciones acumuladas en las vías respiratorias.





## **CAPÍTULO III**

### **HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA**

#### **3.1 HIPÓTESIS**

1. Determinadas cantidades de contaminantes superan los límites permisibles
2. Es posible proponer la minimización de la cantidad de contaminantes mediante el uso de técnicas de Investigación de Operaciones.

#### **3.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

El método utilizado en el desarrollo del presente proyecto es el método descriptivo y analítico, a fin de conocer el comportamiento de los contaminantes del aire

##### **3.2.1 TÉCNICAS UTILIZADAS**

Los datos recolectados de CONAM (Comisión del Medio Ambiente) y DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental), serán procesados con técnicas estadísticas y de Investigación de Operaciones (Programación Lineal y Simulación)

Si se considera a la contaminación del aire como un problema, debe quedar claro que, la Programación Lineal es una herramienta muy útil para algunos análisis importantes sobre la calidad del aire. De hecho, ninguna estrategia para la reducción y control de emisiones a bajo costo será efectiva, sin la aplicación previa de la Programación Lineal.

## CAPÍTULO IV

### MODELOS APLICADOS

En el presente capítulo, la información recolectada se aplicarán las técnicas de la Investigación de Operaciones como lo son la Programación Lineal y la Simulación de Sistemas. Igualmente los datos se aplicarán en dos modelos evaluativos.

#### 4.1 MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL (M.P.L.)

##### 4.1.1 PLANTEAMIENTO y RESOLUCIÓN DEL M.P.L.

Determinar el conjunto de medidas de control a utilizar durante un cierto periodo, capaces de obtener emisiones másicas no superiores a valores prefijados y al menor costo posible.

#### **PROBLEMA**

Tales valores podrían ser las emisiones diarias totales en la Fábrica de Cementos durante un año determinado o la emisión másica en función del tiempo y del emplazamiento durante un día. El Costo contra la contaminación puede expresarse como **C**

**Hipótesis:**

Experimentación con Cemento Pórtland (42.5 Kgs cada bolsa)

<b>P<sub>A</sub>:</b> Producción Anual:	2.5(10) <sup>6</sup> bolsas de cemento
<b>P<sub>AT</sub>:</b> Pérdida de Atmósfera:	2 Kgs de partículas por bolsa de cemento
<b>E<sub>1</sub>:</b> Emisión incontrolada de partículas:	5(10) <sup>6</sup> Kgs por año
<b>E<sub>2</sub>:</b> Emisión no debe superar los:	8(10) <sup>5</sup> Kgs por año
Medidas de Control:	Precipitadores Electrostáticos.
<b>Tipo 1:</b>	Reduce las emisiones a 0.5 Kgs/bolsa a un costo de \$ 0.14 x bolsa.
<b>Tipo 2:</b>	Reduce las emisiones a 0.2 Kgs/bolsa a un costo de \$ 0.18 x bolsa.

**Modelamiento**

El Modelo de Programación Lineal en su forma canónica a utilizar es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 & \text{sujeto a} \\
 & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \\
 & x_j \geq 0 \\
 & i = 1, \dots, m \\
 & j = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

Suponer que:

**X<sub>1</sub>** : Producción de cemento en bolsa/año con unidades del tipo 1 instalada.

**X<sub>2</sub>** : Producción de cemento en bolsa/año con unidades del tipo 2 instalada.

**C<sub>1</sub>** : Costo por bolsa para la medida de control Tipo 1

**C<sub>2</sub>** : Costo por bolsa para la medida de control Tipo 2

Entonces el MPL a resolver es:

$$\text{Min } 0.14 X_1 + 0.18 X_2$$

Sujeto a:

$$X_1 + X_2 \leq 2.5 \cdot (10)^6 \quad \text{Producción Total}$$

$$1.5 X_1 + 1.8 X_2 \geq 4.2 \cdot (10)^6 \quad \text{Reducción de Partículas}$$

$$X_i \geq 0 \quad / \quad i = 1, 2$$

La restricción de **Producción Total** de ambos tipos de Cemento debe ser a lo más de  $2.5(10)^6$  bolsas de cemento.

La restricción de **Reducción de Partículas** se obtiene haciendo los cálculos siguientes:

$$R_i = \text{Pérdida de Atmósfera} - \text{Reducción de Emisiones}$$

Reducción de Partículas utilizando la medida de Control **Tipo 1**:

$$R_1 = 2 - 0.5 \Rightarrow R_1 = 1.5$$

Reducción de Partículas utilizando la medida de Control **Tipo 2**:

$$R_2 = 2 - 0.2 \Rightarrow R_2 = 1.8$$

Entonces la restricción de Partículas debe ser al menos de:

$$5 \cdot (10)^6 - 8 \cdot (10)^5 = 4.2 \cdot (10)^6$$

Utilizando el paquete Lindo se obtuvo el resultado siguiente:

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 2

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 410000.0

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	1000000.000000	0.000000
X2	1500000.000000	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.060000
3)	0.000000	-0.133333

NO. ITERATIONS= 2

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED:

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
X1	0.140000	0.010000	INFINITY
X2	0.180000	INFINITY	0.012000

ROW	CURRENT RHS	RIGHTHAND SIDE RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
2	2500000.000000	300000.000000	166666.671875
3	4200000.000000	300000.000000	450000.000000

Por lo tanto la Solución Óptima es:  $X_1 = 10^6$        $X_2 = 1.5 \cdot (10)^6$

y la Solución óptima es:  $C = \$410,000$

### Conclusiones:

Por el reporte de análisis de sensibilidad:

#### 1. Para el Rango de Sensibilidad de los Coeficientes de la Función Objetivo

$C_1$  puede incrementarse en 0.01, o sea llegar hasta 0.15

$C_2$  puede incrementarse en cualquier valor

$C_1$  puede bajar hasta 0.00

$C_2$  puede bajar hasta 0.168

#### 2. Para el Rango de Sensibilidad de los términos del lado derecho (RHS)

El RHS de la **primera** restricción puede **incrementarse** en 300,000 y así llegar hasta  **$2.8(10^6)$**

El RHS de la **segunda** restricción puede **incrementarse** en 300,000 y así llegar hasta  **$4.5(10^6)$**

El RHS de la **primera** restricción puede **bajar** en aprox. **166667** y así llegar hasta  **$2'333.333$**

El RHS de la **primera** restricción puede **bajar en 450,000** y así llegar hasta  **$3.75(10^6)$**

## 4.2 MODELOS EVALUATIVOS

### 4.2.1 MODELO DE EMISIONES DE TUBO DE ESCAPE

Con los valores establecidos en las Tablas 1 y 3 (Factores y Multiplicadores de Emisión de Contaminantes) y en las Tablas 2 y 4 (Factores y Multiplicadores de Consumo de Combustible), se obtienen los valores de **d** y **m** para las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y COV y el consumo de combustible respectivamente.

#### PROBLEMA 1

Suponiendo que se deben calcular los factores de emisión de NO<sub>x</sub>, CO y COV, así como el factor de consumo de combustibles para vehículos ligeros convencionales (<1400 cc).

Cálculo para una velocidad promedio de 30 km/h, una temperatura media de 20°C y un promedio de recorrido de 8 km, se tiene:

		<b>d (gr/km)</b>	<b>M (km)</b>	<b>e = d*m</b>	<b>Factores y Multiplicadores</b>
<b>Contaminante</b>	NO <sub>x</sub>	1.55	0.997	1.55	Factor y Multiplicador de Emisión de Contaminantes (Tabla 3 y Tabla 5)
	CO	10.10	1.24	12.52	
	COV	1.70	1.18	2.01	
<b>Consumo de Combustible</b>		56.0	1.06	59.36	Factor y Multiplicador de Consumo de Combustible (Tabla 4 y Tabla 6)

#### Conclusión 1:

La emisión real de contaminantes es de 16.08 grs. con un consumo de combustible de 59.36 gr/km.

**PROBLEMA 2**

Suponiendo que se deben calcular los factores de emisión de NO<sub>x</sub>, CO y COV, así como el factor de consumo de combustibles para vehículos ligeros convencionales (<1400 cc).

Cálculo para una velocidad promedio de 50 km/h, una temperatura media de 20°C y un promedio de recorrido de 8 km, se tiene:

		<b>d (gr/km)</b>	<b>m (°C/km)</b>	<b>e = d*m</b>	<b>Factores y Multiplicadores</b>
<b>Contaminante</b>	NO <sub>x</sub>	1.85	0.997	1.79	Factor y Multiplicador de Emisión de Contaminantes (Tabla 3 y Tabla 5)
	CO	7.00	1.24	8.68	
	COV	1.20	1.18	1.42	
<b>Consumo de Combustible</b>		40.0	1.06	42.4	Factor y Multiplicador de Consumo de Combustible (Tabla 4 y Tabla 6)

**Conclusión 2:**

La emisión real de contaminantes es de 11.88 grs. con un consumo de combustible de 42.4 gr/km.

**Conclusión:**

De las conclusiones 1 y 2, se tiene que a mayor velocidad a una misma temperatura ambiental y una misma distancia de recorrido, tanto la emisión de contaminantes, como el consumo de combustible son menores que a una menor velocidad.



#### 4.2.2 MODELO DE EMISIONES EVAPORABLES DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLATILES (COV)

##### PROBLEMA

Calcular los factores de emisión media anual para las pérdidas de combustible por difusión de calor, diurnas y durante el recorrido, así como las emisiones por evaporación anuales de una flota de vehículos ligeros grandes y pequeños con motores de gasolina en Lima.

Datos climatológicos y sobre la volatilidad de la gasolina:

País	: Perú
Ciudad	: Lima
Vehículos	: 950,000 (80% con motores < 1,400 c.c.)
Kilometraje	: 8,000 km/año (dentro de la ciudad)
$T_{media}$	: 20 °C
TD	: 18°C
$L_{viaje}$	: 8,000 km/año
PV	: 70 kp

##### Solución

De las tablas 8 y 9 y la fórmula 2, se obtienen los factores de emisión buscados para los valores  $T_{media}$ , TD,  $L_{viaje}$  y PV de la gasolina:

Utilizando la fórmula siguiente:

$$e_{emisión \text{ conta min ante}} = \frac{(T_{media} \cap PV)}{L_{viaje}} = P_{pérdida \text{ combustible durante el recorrido}}$$

**Fórmula 3**

**Para vehículos pequeños (< 1,400 c.c.): (Tabla 8)**

Se tiene, para la emisión de contaminante y pérdida de combustible:

$$e_{emisión\ de\ comta\ min\ ante} = \left( \frac{1.12}{8} \right) = 0.14\ g / km$$

$$p_{pérdida\ combustible\ durante\ el\ recorrido} = 0.02\ gr / km$$

**Para vehículos grandes (> 1,400 c.c.): (Tabla 9)**

$$e_{emisión\ comta\ min\ ante} = \left( \frac{1.94}{8} \right) = 0.243\ g / km$$

$$p_{perdida\ de\ combustible\ durante\ el\ recorrido} = 0.047\ g / km$$

Aplicando la fórmula 2 (página 24), para obtener la emisión diurna:

$$e_{diurna} = -9.125 + 0.1862.(18) + 0.2263.\left(20 + \frac{18}{2}\right) + 0.0803.(70)$$

$$e_{diurna} = 6.4\ kg / (vehículo * año)$$

De los factores de emisión mencionados, el número de vehículos y el kilometraje anual se obtiene:

**Para vehículos pequeños (< 1,400 c.c.): (Tabla 8)**

Como el número de vehículos es:  $N_1 = 0.8(950,000) \Rightarrow N_1 = 760,000 \text{ autos}$

$N_2 = 0.2(950,000) \Rightarrow N_2 = 190,000 \text{ autos}$

Reemplazando en la fórmula 1 (página 19):

$$e_{\text{emisión conta min ante}} = 0.14 \cdot \left( \frac{8,000 * 760,000}{10^6} \right) = 851 \text{ t / año}$$

$$e_{\text{pérdida combustible}} = 0.02 \cdot \left( \frac{8,000 * 760,000}{10^6} \right) = 122 \text{ t / año}$$

**Para vehículos grandes (> 1,400 c.c.): (Tabla 9)**

$$e_{\text{emisión conta min ante}} = 0.243 \cdot \left( \frac{8,000 * 190,000}{10^6} \right) = 369 \text{ t / año}$$

$$e_{\text{pérdida combustible}} = 0.047 \cdot \left( \frac{8,000 * 190,000}{10^6} \right) = 71 \text{ t / año}$$

Para vehículos pequeños y grandes:

$$e_{\text{diurna}} = 6.4 \cdot \left( \frac{950,000}{10^3} \right) = 6,080 \text{ t / año}$$

$$\Rightarrow \text{evaporable total} = (851 + 122 + 369 + 71) + 6,080 = 7,493 \text{ t / año}$$

### 4.2.3

## GRÁFICOS DE LOS FACTORES Y MULTIPLICADORES DE EMISIÓN Y CONSUMO DE CONTAMINANTES

## FACTORES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES

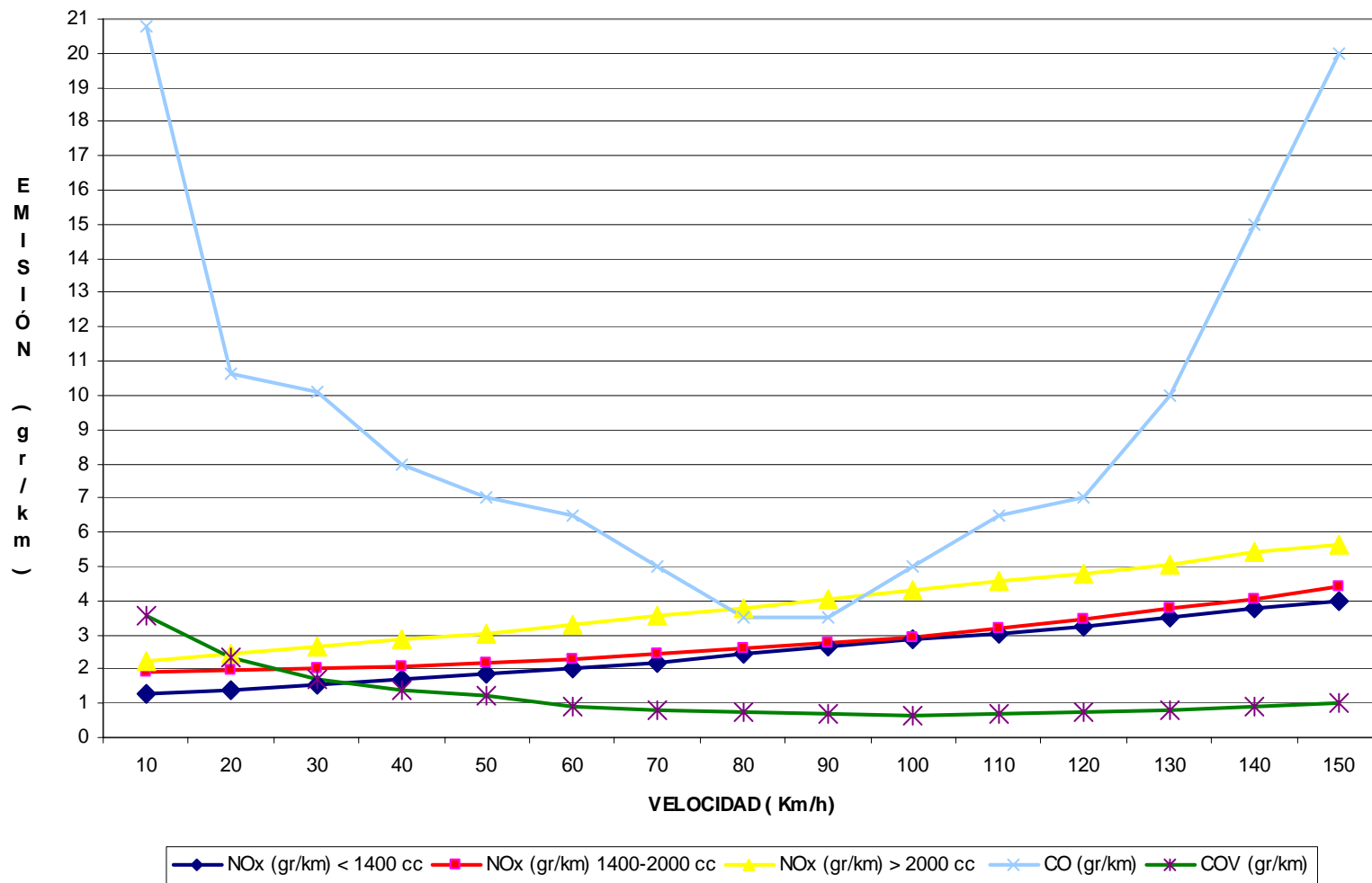
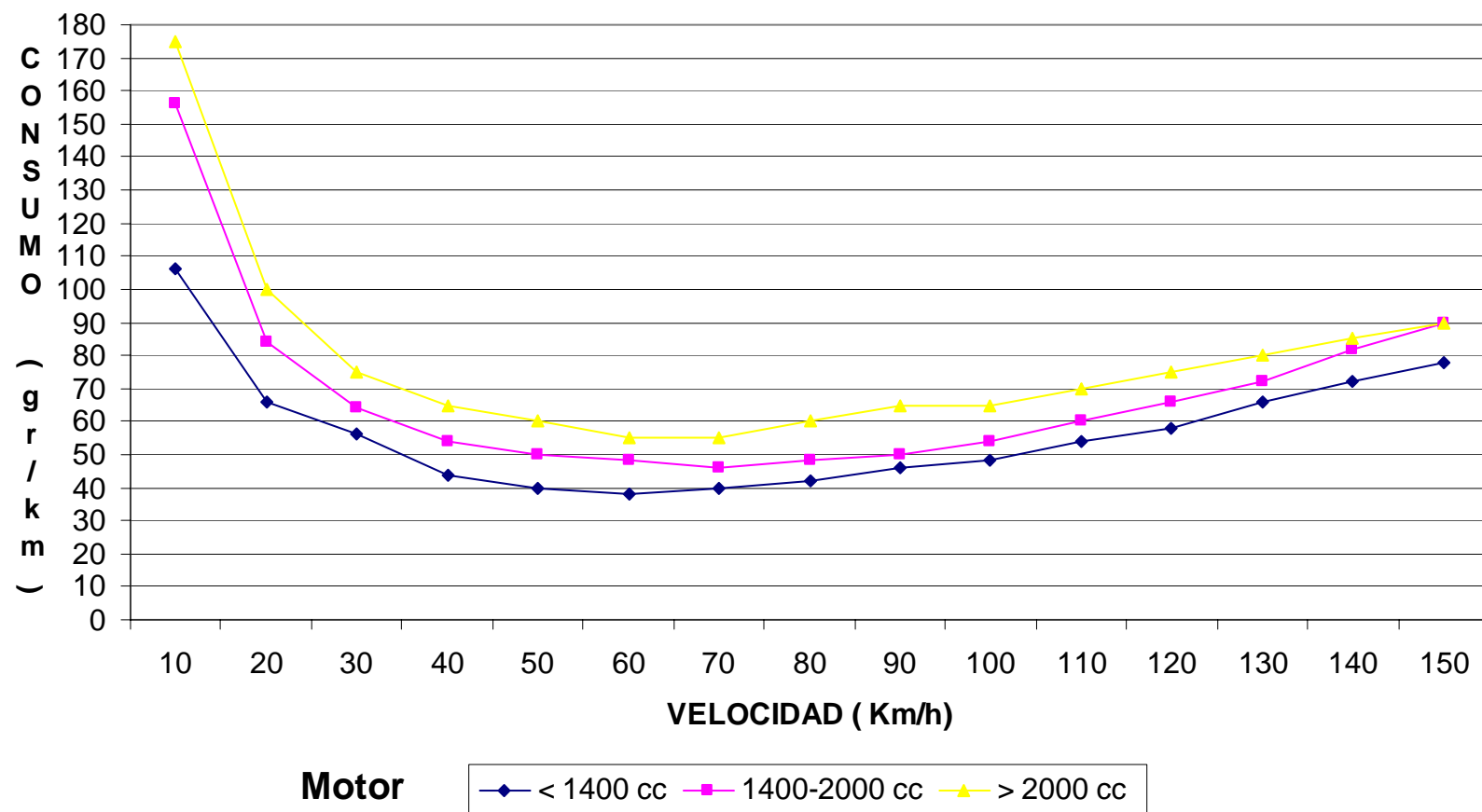


Figura 2

Fuente: Tabla 3 -

### FACTORES DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE



**Figura 3**

Fuente: Tabla 4 - página 21